

曲率半径変化を利用した光ファイバセンサシステムにおける グレーデッドインデックス構造の効果

西 仁司¹, 正藤 慎司¹, 青木 政幸¹, 上田 正紘², 桜井 哲真¹

¹福井大学 ファイバーアメニティ工学専攻 (〒910-0017 福井市文京3-9-1)

²福井大学 教育地域科学部 (〒910-0017 福井市文京3-9-1)

Effect of Graded-Index Optical Fiber Structure for Sensor Systems using Changes in Radius of Curvature

Hitoshi NISHI,¹ Shinji MASATOU,¹ Masayuki AOKI,¹

Masahiro UEDA,² and Tetsuma SAKURAI¹

¹Fiber Amenty Engineering Course, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507

²Department of Human Ecology and Technology, Faculty of Education, and Regional Studies, University of Fukui,
3-9-1, Bunkyo, Fukui 910-8507

An optical fiber sensor system using the radius of curvature changes has been proposed. The system can be laid on the face of a target building construction. Experiments on the proposed technique showed that the graded-index polymer optical fiber (GI-POF) had sensitivity to radius of curvature changes and the advantage of mechanical flexibility suitable for sensing a small radius of curvature. Optical losses by changing the radius of curvature in the graded-index optical fiber have been calculated with either simple methods that lack sufficient accuracy or others that require a large capability to calculate. A calculation algorithm that allows the quantitative evaluation of optical losses in bending fiber by a computer with a reasonable performance has been invented, and it has been adopted to a newly developed simulator. The simulation result was comparable to experimental data in the range of 2 dB, in which the radius of curvature is several mm.

Key Words: Optical fiber sensor, Radius of curvature, Graded-index, Bend loss calculation

1. はじめに

光ファイバを構造物のひずみや亀裂などの異常を検出するセンサとして利用する研究が注目を集め、一部では実用化されている¹⁾。これらのセンサでは、構造物の応力や亀裂などによって、構造物内あるいはその表面に敷設された光ファイバ内で発生する後方散乱光の特性変化を利用することが一般的である。この後方散乱光の観測には、光時間領域反射測定器(Optical Time-Domain Reflectometer: OTDR)を用いる。光ファイバの一方の端面にOTDRを接続するだけで対象とする光ファイバの特性変化の測定が可能である。そのため、この方法を用いることでトンネルや山の斜面、堤防など、大規模な構造物の形状異常の監視を手軽に行うことができると考えられている²⁾。

光ファイバ内の後方散乱光の一種であるブリルアン散乱光は、光ファイバのひずみに依存してパワースペクトルが変化する。近年、このブリルアン散乱光のパワースペクトルを計測できる光ファイバひずみ測定器(Brilloiun OTDR: BOTDR)を利用した構造物監視システムの研究や

実用化が進められている^{3,4)}。しかし、対象の光ファイバ中に複数のひずみが存在する場合には検出精度が低下すること、ひずみの解析に時間を要すること、BOTDRが高価なことなどの問題点がある⁵⁾。

一方、光ファイバの曲率半径変化によって透過光損失や後方散乱光レベルが変化する特性を利用した構造物監視手法が検討されている⁶⁻⁸⁾。この手法はOTDRを利用することで実現できるため、低コストで長距離多地点の監視が可能である。しかし、これらの論文ではシングルモード光ファイバを主とした検討がなされており、マルチモード光ファイバやその後の開発によって利用可能となったプラスチック素材の光ファイバ^{9,10)}についての考察は少ない。

本論文では、光ファイバの曲率半径変化を利用した構造物監視システムのセンサを提案する。提案システムにおいては、計測対象に接して敷設された光ファイバの曲率半径変化が対象構造物の物理的な変位で強調される構成を考案した。また、マルチモード光ファイバの曲げ損失を予測するための基本計算アルゴリズムを提案する。さらに、このアルゴリズムを用いたシミュレータを作成

し、実験値との比較からその有効性を確認した。

2. センサ用光ファイバの敷設手法

敷設された光ファイバの曲率半径変化と、変化部分での光損失の関係を明らかにした実験結果について述べる。

2.1 光ファイバの曲率変化と透過光損失の関係

Table 1に仕様を示す市販のシングルモード石英製光ファイバ(以下SM石英光ファイバとよぶ)とグレーテッドインデックス型マルチモードプラスチック光ファイバ(以下GI-POF)に対して、長さ方向の小さな曲げ(microbending)を与え、曲率半径の局所的な変化を作り出した(Fig. 1参照)。それぞれの光ファイバにOTDRで用いられる1.3 μm波長のレーザー光を入射し、局所的な曲げがない場合と、曲げた場合との透過光パワーを比較することで、曲率半径変化による透過光損失を測定した。SM石英光ファイバの曲率半径変化による透過光損失の予測には、Marcuseの導出した以下に示す(1)式¹¹⁾を用いた。

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi} u^2}{2v^2 w^3 \{K_1(w)\}^2 \sqrt{Ra}} \exp\left(-\frac{4w^3 R \Delta}{3v^2 a}\right) \quad (1)$$

α : 単位長さあたりの光損失

R : 曲率半径

n_1 : コアの屈折率

n_2 : クラッドの屈折率

a : 光ファイバのコア半径

β : 光ファイバ内の光の伝搬定数

k : 光の波数

$v = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$: 正規化周波数

Table 1 Optical fiber specifications.

	SM opt. fiber	GI-POF
Material	Glass	Polymer
Core diameter [μm]	9.334	120
Core reflective-index	1.466	1.357 (Max)
NA	0.121	0.185

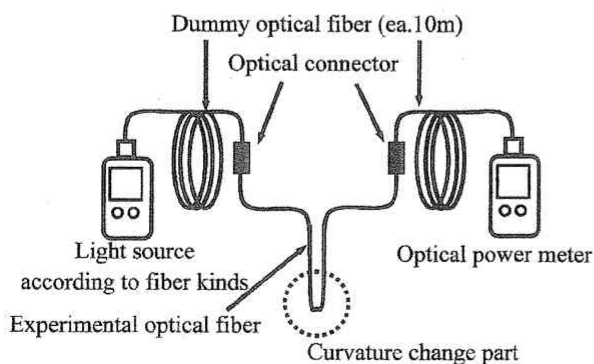


Fig. 1 Experimental setup for optical loss by the radius of curvature.

$u = a\sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2}$: コア内正規化横方向伝搬定数

$w = a\sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}$: クラッド内正規化横方向伝搬定数

K_1 : 第2種変形ベッセル関数

$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$: 比屈折率差

Fig. 2に示すように、SM石英光ファイバの曲げ損失は、計算結果と測定結果の間でよい一致を示し、曲率半径が0.6 cm程度より小さくなると光損失が急増する傾向を両者で確認した。この曲率半径を小さくして光損失を測定する実験過程で、センサ用途としては看過し得ない事象を見出した。SM石英光ファイバでは、0.2 cm程度まで曲率半径を小さくすると、不可逆な変形が生じて光学的な特性変化が固定されてしまった。これは石英光ファイバの破断が原因であり、曲率半径を破断前の状態に戻しても、破断地点から先の監視を行うために十分な光の強度を保つことができなかった。

一方、GI-POF¹⁰⁾では0.6 cm程度の曲率半径の付近でSM石英光ファイバと同じような光損失の増加傾向が観測された。しかし曲率半径が0.4 cm以下になるとSM石英光ファイバに比べて光損失の増加が抑えられ、概ね10 dBを超えることはなかった。さらに曲率半径を0.2 cm程度まで減少させても、SM石英ファイバに見られたような光学的な特性の固定は見られなかった。これらGI-POFが示す特性は、構造物の異常検出を行う上で、高い検出感度と測定可能距離の拡大につながると考えた。つまり前者の特性は、曲率半径を0.6 cm程度に設定するとSM石英ファイバと同等な検出感度を実現できることを意味している。後者の特性は、SM石英光ファイバが破断するような曲率半径をGI-POFにもたらし対象の形状変化が生じて、その地点より先の監視が引き続き可能であることを示している。光ファイバを用いた構造物監視システムには、1本の光ファイバで多地点の監視を行うことが求められるため、このような特性は有用である。

これらの点から、光ファイバの曲率半径変化を利用したセンサシステムには、GI-POFが有用であると判断した。

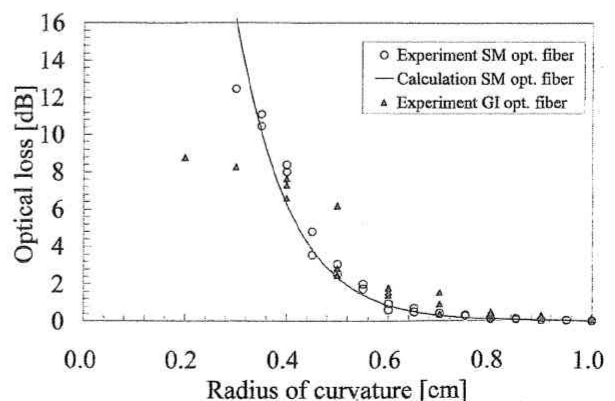


Fig. 2 Curvature loss of optical fibers.

2.2 光ファイバ敷設手法の提案

光ファイバの曲率半径変化と透過光損失の関係を明らかにした先の実験結果より、曲率半径を小さくしていくと透過光損失が急激に大きくなる曲率半径が存在している。このような曲率半径では微小な曲率半径変化に対して大きな光減衰量の変化を観測することができる。センサの感度向上の面からは、敷設する光ファイバにそのような曲率半径に近い値をあらかじめ与える手法が有効と考えられる。今回実験に用いたGI-POFの場合、曲率半径が0.6 cm程度以下の時に曲率半径変化に対する透過光損失の変化量が大きい。よって0.6 cm程度の曲率半径をあらかじめ持たせて敷設することで、感度の高いセンサを構成できると考えた。このような構成を実現する敷設手法の一例の平面図及び断面図をFig. 3に模式的に示した。図において建物の壁及び床に固着されるL型及びI型の2種類の敷設治具は光ファイバを蛇行させる小さなピンを有し、これらのピン間に光ファイバが挿入されることで所望の曲率半径を光ファイバに与えるものである。建物がひずみ、床と壁の角度が変わると、L型及びI型の敷設治具のピン間隔が変わり、光ファイバに曲率半径の変化が生じる構造となっている。

次に、Fig. 3の構成を模擬する光ファイバの敷設治具を試作し、提案した敷設手法の妥当性を確認する実験を行った。実験にはOTDRの計測に用いる波長 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ の光に加えて、波長 $\lambda = 0.635 \mu\text{m}$ の可視光レーザーを光ファイバ中に入射させた。波長が $1.3 \mu\text{m}$ の光の減衰は視認できないが、 $0.635 \mu\text{m}$ の可視光の減衰が目視できた。この様子をFig. 4に示す。曲率半径が小さくなった部分では、ピン近傍の光ファイバから光の漏れる様子が観測できている。光の漏れは光信号の損失が光ファイバ内で発生していることを意味している。この結果、提案した敷設手法を利用することで、光損失を発生させる曲率半径を敷設された光ファイバに作り出せることが分かった。敷設治具を利用してあらかじめ適切な曲率半径を光ファイバに与えることで、構造物の変位をOTDRで感度よく検出できる見通しを得た。

3. マルチモード光ファイバの曲げ損失評価 —シミュレータの作成—

SM石英光ファイバの曲げ損失特性はMarcuseの理論式で精度よく近似できることが知られており、今回の実験結

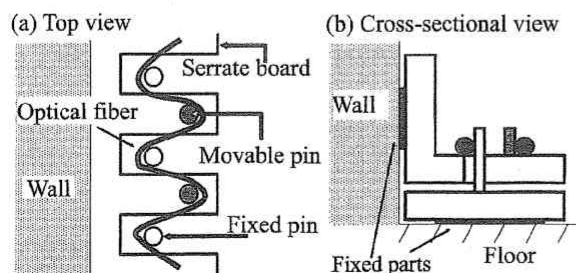


Fig. 3 Optical fiber layout method.

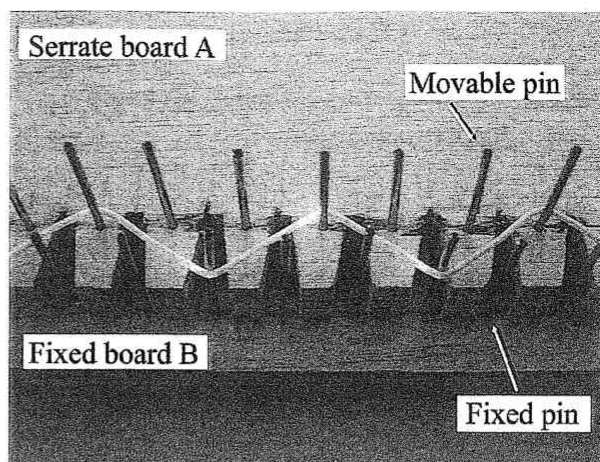


Fig. 4 Light leakage from small curvature part with proposed layout method.

果もこの式で説明できた。GI型光ファイバの曲げ損失特性を予測する手法としてはGlogeやSakaiらの提案した方法が有名である^{[2],[3]}。

Glogeは各モードを光線近似し、個々のモードに対して曲げ損失を見積もる式を導出した。SakaiらはGI型の屈折率プロファイルを階段状の多段のステップインデックスで近似し、その各層の中で伝搬するモードのパワーから曲げ損失を推定している。しかし、どちらの手法でも曲率半径の減少に伴って曲げ損失が指数関数的に単調増加する計算値が求められる。しかし、今回の実験で観測された曲げ損失が頭打ちとなる傾向をこれらの手法から見出すことはできない。

ここで、著者らは上記実験結果の定量的な理解を目的として、GI-POFの曲率半径変化と光減衰量との関係を実用的に求め得る計算手順を検討した。マルチモード光ファイバの伝搬特性の計算方法としては、全ての伝搬モードの特性を解析する方法が容易に考えられる。しかし、伝搬モードが数百に及ぶ場合、一つ一つのモード特性の違いが光ファイバ全体の伝搬特性に与える影響は小さいと考えた。その上で、伝送線路中での伝搬モード数の変化で光ファイバ全体の伝搬特性が近似的に表せると考え、この概念を元にした光ファイバの曲げ損失の計算手順を着想した。

今回着想した計算手法では、光を粒子として扱い、コア内を伝搬する光を光粒子の軌跡で表した。上述の理由によりモードの種類や伝搬定数などは計算せず、光源の強度分布を考慮した上で光粒子の入射角度はランダムに決定する。光ファイバの屈折率分布をもとに、入射された全ての光粒子に対して伝搬経路を計算する。そのため、極めて多数の伝搬モードが存在する光ファイバの状態を計算する手法といえる。

光粒子の軌跡の計算アルゴリズムについて述べる。Fig. 5にアルゴリズムのフローチャートを示す。まず、光ファイバの屈折率プロファイルを設定し、個々の光粒子の入射位置、移動ベクトルを設定する。光粒子の入射に関しては、厳密にはLEDの発光強度分布に応じた光ファイバ端面での光強度分布が存在するが、これは光ファイバ端面

における光粒子の度数分布で表した。入射された光粒子は単位時間ごとに移動ベクトルに従って直進するとし、移動ベクトルは周辺の屈折率分布をもとに計算される。つまり、ある時刻での光粒子の

$$\text{位置ベクトル} \quad \mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z) \quad (2)$$

$$\text{移動ベクトル} \quad \mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z) (|\mathbf{m}|=1) \quad (3)$$

とすると、次の時刻での位置ベクトルは

$$\mathbf{p}' = (p'_x, p'_y, p'_z) = \mathbf{p} + \mathbf{m}$$

と計算される。

位置 \mathbf{p} での屈折率を n_1 、位置 \mathbf{p}' での屈折率 n_2 をとすると、スネルの法則にしたがって屈折する場合、次の時刻の移動ベクトルは以下のように計算される。

$$\mathbf{m}' = (m'_x, m'_y, m'_z) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{p_x'^2 + p_y'^2}} \frac{n_1}{n_2} \left(p_x' \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_{nm}} \mp p_y' \sqrt{\sin^2 \theta_{nm} - m_z^2} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{p_x'^2 + p_y'^2}} \frac{n_1}{n_2} \left(p_y' \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_{nm}} \mp p_x' \sqrt{\sin^2 \theta_{nm} - m_z^2} \right) \\ \frac{n_1}{n_2} m_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\text{ただし } \sin \theta_{nm} = \sqrt{1 - \frac{(m_x p_x + m_y p_y)^2}{p_x^2 + p_y^2}}$$

この計算式の導出過程は付録に示す。この計算を次々に行い、各時刻での光粒子の位置を計算し、軌跡を求める。曲げ部では、曲げの中心からの距離を利用して移動

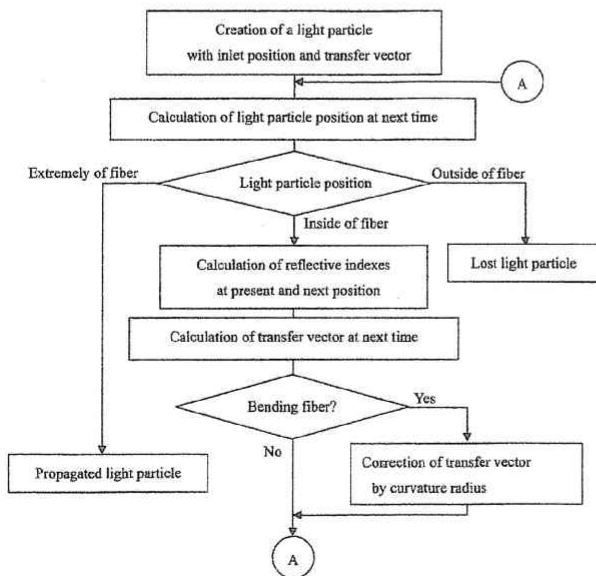


Fig. 5 Flowchart of the computational algorithm for trajectories of light particles.

ベクトルを補正し、光粒子の軌跡を再現する。最後に、入射された光粒子の総数と、光ファイバの另一端に到達した光粒子の総数から伝送路の伝搬特性を計算する。

このように光ファイバに存在するモードに基づいた解析を省略することで、アルゴリズムを単純化できた。このアルゴリズムを用いて、光ファイバセンサのシミュレータを作成することができる。シミュレータで計算したファイバ内を伝搬する光の軌跡の一例をFig. 6に示す。

シミュレーションで得られた曲率半径と透過光損失の関係を実験結果と共にFig. 7に示した。0.2 cmから1 cmの曲率半径で、シミュレーション結果は2 dB程度の差異で実験結果と一致した。特に従来の計算手法で再現が困難であった曲率半径0.4 cm以下での光減衰量の増加抑制傾向をこの計算手法で再現できることが分かった。このことは、GI型光ファイバの曲げ損失特性の予測には、伝搬光を光線近似するこの計算手法が有効であることを示している。

4. まとめ

本論文では、光ファイバの曲げ損失が曲率半径変化に伴って変化する特性を利用した建築建造物の異常をモニタする光ファイバセンサの特性とその敷設手法を提案した。このセンサの光ファイバとしては、光学的な特性の固定が起きにくく、微小曲率半径ではその変化に伴って緩やかに曲げ損失が変化するため、センサの計測可能距離を広げる効果が期待できるGI-POFが有効という結果を得た。敷設手法としては、光ファイバを監視対象に敷設

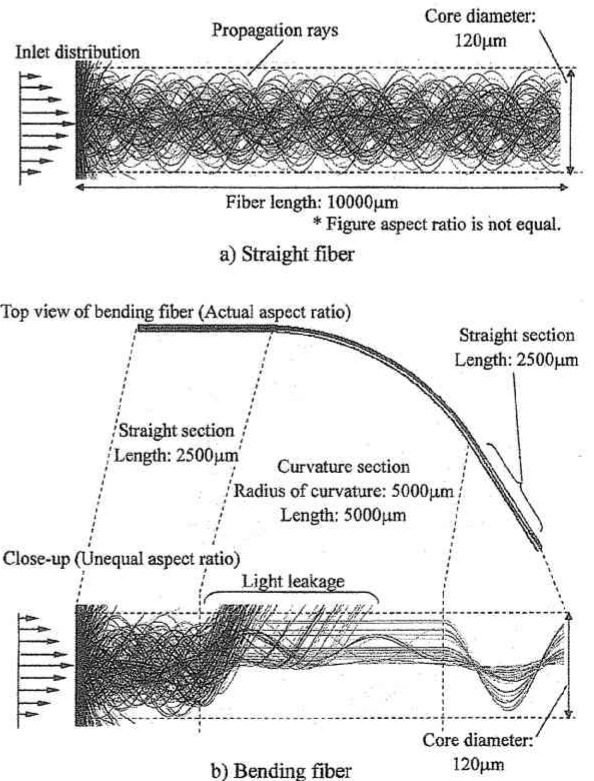


Fig. 6 Simulation result.

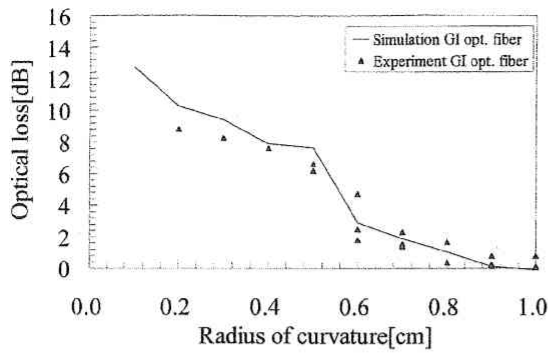


Fig. 7 Simulation and experiment result of optical loss.

する際、あらかじめ光損失が大きくなり始める曲率半径を与えておくことで、より感度の高いセンサが実現できると考えた。試作した敷設治具を使った実験によって、この敷設手法の有効性が確認できた。

また、GI-POFの曲げ損失特性を見積もるにあたり、光ファイバ内の光を光線で表現する計算手法と、アルゴリズムを提案した。これらを採用した光ファイバの曲率半径変化に伴う光損失特性を計算するシミュレータを作成した。このシミュレータを用いてGI型光ファイバの曲率半径変化に伴う光損失を計算した結果、0.2 cmから1 cmの曲率半径において実験値と一致することを確認した。この結果、伝搬モードが多数存在する光ファイバにおいて、形状変化による透過光損失の見積もり手法としては、伝搬光を光線近似する計算手法が有効であることを示した。

謝 辞

本研究のきっかけを与えていただき、また専門的な知識でご指導いただいた福井大学大学院工学研究科小林 喬郎教授に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 座古 勝, 裏垣 博, 小館 一浩: 材料 **44** (1995) 493.
- 2) M. Kihara, K. Hiramatsu, M. Shima, and S. Ikeda: IEICE TRANS. ELECTRON. **E85**(C) (2002) 952.
- 3) H. Ohno, H. Naruse, M. Kihara, and A. Shimada: Opt. Fiber Technol. **7** (2001) 45.
- 4) A. Shimada, H. Naruse, K. Uzawa, G. Kimura, H. Murayama, and K. Kageyama: IEICE TRANS. ELECTRON. **E86**(C) (2003) 218.
- 5) 山田 孝行: 電子情報通信学会論文誌 **B J85**(B) (2002) 839.
- 6) 南谷 林太郎, 保川 彰夫, 小町谷 昌宏, 渡辺 静久: 日本機械学会論文集 (A編) **66** (2000) 165.
- 7) 轟 章, 畠中 隆, 小林 英男, 中村 春夫, 島村 佳伸: 日本機械学会論文集 (C編) **63** (1997) 14.
- 8) 高橋 淳, 野村 正人, 津田 浩, 剣持 潔, 福田 博: 日本機械学会論文集 (A編) **65** (1999) 106.
- 9) POFコンソーシアム: プラスチック光ファイバー (共立出版, 1997).
- 10) Y. Koike, T. Ishigure, and E. Nihei: J. Lightwave Technol. **13** (1995) 1475.
- 11) D. Marcuse: J. Opt. Soc. Am. **66** (1976) 216.
- 12) D. Gloge: Appl. Opt. **11** (1972) 2506.
- 13) J. Sakai and T. Kimura: Appl. Opt. **17** (1978) 1499.

付 録

曲率半径変化を考慮した光ファイバ透過光損失の計算式の導出

光粒子の現在位置と移動ベクトル, 光ファイバの屈折率分布が与えられたときに, 次の時刻における光粒子の位置と移動ベクトルを算出する式は以下のように導出された。

$$\text{位置ベクトル } \mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z) \quad (\text{A1})$$

$$\text{移動方向ベクトル } \mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z) (|\mathbf{m}|=1) \quad (\text{A2})$$

とする。それぞれの変数にダッシュのついたものは次の時刻のものを表している。

光ファイバ内を円筒座標系で考えると, 半径方向(\mathbf{r} 方向)への単位ベクトル \mathbf{n} (=等屈折率面の単位法線ベクトル)は

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}} (p_x, p_y, 0) \quad (\text{A3})$$

となる。 \mathbf{n} と移動方向ベクトル \mathbf{m} のなす角を θ_{nm} とすると,

$$\cos \theta_{nm} = \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{m}| |\mathbf{n}|} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}} (m_x p_x + m_y p_y) \quad (\text{A4})$$

なる関係がある。 θ - z 平面へ \mathbf{m} を投射したときの長さ $m_{\theta z}$ は

$$m_{\theta z} = |\mathbf{m}| \sin \theta_{nm} = \sin \theta_{nm} \quad (\text{A5})$$

である。また、 \mathbf{m} と \mathbf{n} で作られる平面と z 軸がなす角を ϕ とすると,

$$\cos \phi = \frac{m_z}{m_{\theta z}} = \frac{m_z}{\sin \theta_{nm}} \quad (\text{A6})$$

なる関係がある。

\mathbf{p} と \mathbf{m} を用いて次時刻の位置ベクトル \mathbf{p}' を計算する。位置 \mathbf{p} での屈折率を n_1 , 位置 \mathbf{p}' での屈折率を n_2 とする。スネルの法則を適用して次時刻の θ_{nm} である θ_{nm}' は

$$\theta_{nm}' = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{nm} \quad (\text{A7})$$

となる。屈折・反射が起きても $\phi' = \phi$ なので

$$m_z' = \cos \phi' \sin \theta_{nm}' = \cos \phi \sin \theta_{nm}' = \frac{\sin \theta_{nm}'}{\sin \theta_{nm}} m_z \quad (\text{A8})$$

と計算できる。 x 軸と r 軸がなす角 θ_{xr} には以下の関係がある。

$$\cos \theta_{xr}' = \frac{p_x'}{\sqrt{p_x'^2 + p_y'^2}}, \quad \sin \theta_{xr}' = \frac{p_y'}{\sqrt{p_x'^2 + p_y'^2}} \quad (\text{A9})$$

\mathbf{m} を xy 平面に投影したベクトルと r 軸がなす角を θ_{mxy} とすると

$$\cos \theta_{m_{xy}'} = \frac{\cos \theta_{nm}'}{\sqrt{1 - m_z'^2}} \quad (\text{A10})$$

と計算できる．以上から得られた θ_{xr} , $\theta_{m_{xy}r}$ を利用して次時刻の移動方向ベクトルは次のように求められる．

$$m_x' = \sqrt{1 - m_z'^2} \cos(\theta_{xr}' \pm \theta_{m_{xy}r}') \quad (\text{A11})$$

$$m_y' = \sqrt{1 - m_z'^2} \sin(\theta_{xr}' \pm \theta_{m_{xy}r}') \quad (\text{A12})$$

$\sin \theta_{m_{xy}r}'$ を正負どちらにとるかによって，光線の回転方向が決まる．

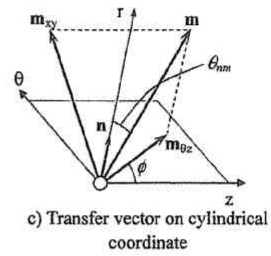
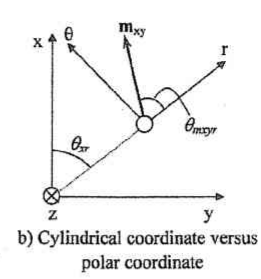
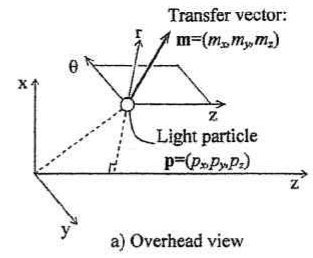


Fig. A1 Vector definition.